



### **III-280 - RECICLAGEM MECÂNICA DO POLIPROPILENO: AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES E ESTIMATIVA DE CUSTO ENERGÉTICO**

**Daniel Brinckmann Teixeira<sup>(1)</sup>**

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

**Rosana Louzada Müller**

Acadêmica do curso de Química Industrial na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

**Adilson Moacir Becker Júnior**

Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental na Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC)

**Cláudia Mendes Mählmann**

Física pela UNISC. Mestre em Ciências pela UFSC. Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela UFRGS. Professora do Departamento de Química e Física da UNISC.

**Adriane Lawisch Rodríguez**

Engenheira Química pela Escola de Engenharia da PUCRS. Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela Escola de Engenharia da UFRGS. Doutora em Engenharia, Berlim- Alemanha. Professora do Departamento de Engenharia, Arquitetura e Ciências Agrárias da UNISC.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Duque de Caxias, 305 – Bairro Rincão Comprido – Candelária – RS – CEP: 96930-000 – Brasil – Tel: +55 (51) 3743-1850 – email: dteixeira@unisc.br

#### **RESUMO**

A medida com que evoluímos, surgiram tecnologias que nos permitiram transformar a maioria dos materiais existentes. Passamos então a dominar a transformação do vidro, do ferro, da madeira e, também, dos plásticos. Segundo Canto (1995), a evolução da tecnologia possibilitou que materiais naturais fossem processados fornecendo produtos com importantes aplicações. Dentre os muitos materiais criados com esses avanços, estão os plásticos. No entanto, nem sempre o desenvolvimento de uma determinada tecnologia significa tão somente avanços e progresso. Por vezes, esse desenvolvimento vem acompanhado de incontáveis prejuízos ao equilíbrio do ambiente, como é o caso dos materiais plásticos.

Nesse contexto a reciclagem de plásticos surge como alternativa, vindo a contribuir para destinação correta das imensas quantidades de resíduos plásticos acumulados em nosso planeta. Viabilizar a reciclagem do polipropileno é uma atividade válida no que diz respeito à questão de preservação ambiental, para isso, a avaliação das propriedades mecânicas desse material é fator determinante no que diz respeito a sua aceitação junto ao mercado consumidor.

Sendo assim, o foco desse estudo é caracterizar o polipropileno reciclado, verificando a degradação ocorrida durante seu processamento e mensurando o gasto de energia envolvido no processo de reciclagem mecânica. Através disso, discutir a melhor maneira de transformar esse resíduo plástico em matéria-prima.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reciclagem, Polipropileno, Plásticos, Consumo Energético, Propriedades.

#### **INTRODUÇÃO**

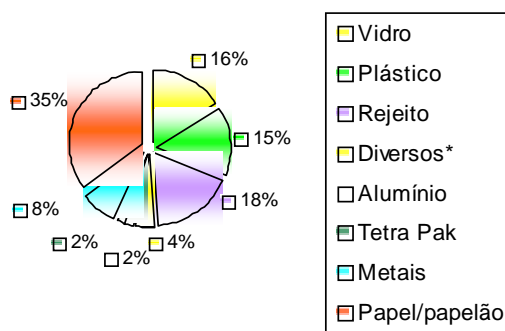
Desde a descoberta do plástico até os dias atuais, surgiram diferentes formas de aplicação, permitindo que eles fossem empregados desde a fabricação de brinquedos, calçados e embalagens simples até a sofisticada indústria aeronáutica e de componentes automotivos. Porém, o caráter descartabilidade aliado ao estilo de vida consumista de nossa sociedade, acabou por gerar problemas relacionados ao destino final das enormes quantidades de resíduos sólidos produzido em nosso planeta (Tabela 1).



**Tabela 1 – Geração de resíduos sólidos per capita por país.**

PAÍS	kg/DIA
EUA	3,2
Itália	1,5
Holanda	1,3
Japão	1,1
Brasil	0,5 até 1,0
Portugal	0,6

Considerando o problema ocasionado pela geração e posterior acúmulo de resíduos sólidos, os resíduos plásticos tornam-se um agravante a essa questão, uma vez que compõem uma parcela bastante significativa do problema. Na Figura 1, é apresentado o gráfico de composição dos resíduos sólidos, onde se observa que 15% dos resíduos são materiais plásticos, o que é bastante expressivo.



**Figura 1 – Composição média dos materiais provenientes da coleta seletiva em 236 municípios brasileiros.**

Se por um lado à descoberta do plástico possibilitou a criação de diversos artefatos úteis ao nosso conforto, por outro, as consequências do uso e descarte incontrolado desses materiais nos levam a questionar sua real necessidade de utilização. Podemos afirmar sem dúvida que são práticos e auxiliam o homem em diversas tarefas, porém, conforme a gama de aplicação aumenta, cresce também o impacto da disposição final sobre o meio ambiente.

Em virtude dos plásticos representarem uma boa parte dos resíduos gerados pelo homem, até então a maneira mais adequada para a gestão deles é o reaproveitamento via reciclagem, possibilitando sua aplicação como matéria-prima para um novo processo de fabricação.

Na tentativa de viabilizar a aplicação de resíduos plásticos como matéria-prima se faz necessário avaliar as propriedades físico-químicas e físico-mecânicas desses materiais, indicando a partir dessa avaliação se o material é passível de nova aplicação.

Nesse contexto, esse projeto tem como proposta verificar de que forma os processos envolvidos na reciclagem mecânica alteram as propriedades do polipropileno pós-consumo através da avaliação de sua resistência mecânica e de outras propriedades. Em paralelo a isso, mensurar o gasto energético envolvido no processo de reciclagem mecânica de plásticos, estimando seu custo efetivo.

## METODOLOGIA

A parte prática do estudo consistiu em obter amostras de polipropileno (PP) pós-consumo provenientes das bombonas de água mineral 20 litros, originadas na quebra de processo de uma empresa de bebidas. Após moagem, as bombonas de polipropileno deram origem a amostras que foram submetidas aos diferentes processos envolvidos na reciclagem mecânica de plásticos (Tabela 2). Posteriormente, foram avaliadas suas propriedades através de ensaios físico-químico e físico-mecânico.



Tabela 2 – Amostras e processos envolvidos.

CÓDIGOS DAS AMOSTRAS	PROCESSOS ENVOLVIDOS
virgem inj	Apenas injeção
moa inj	Moagem e injeção
moa aglut inj	Moagem, Aglutinação e Injeção
moa extr inj	Moagem, Extrusão e Injeção
moa homo moa inj	Moagem, Homogeneização, Moagem e Injeção
moa extr homo moa inj	Moagem, Extrusão, Homogeneização, Moagem e Injeção

## EQUIPAMENTOS

No processamento das amostras desenvolvidas para o presente estudo foram utilizadas as instalações da Planta Piloto de Reciclagem Mecânica de Plásticos e o Laboratório de Polímeros, Embalagens e Reciclagem do Grupo de Pesquisa em Reciclagem de Plásticos da Universidade de Santa Cruz do Sul. Os equipamentos utilizados no processamento mecânico das amostras foram: moinho de facas Mecanofar MF300/R, aglutinador RS-Serviços, extrusora SEIBT modelo ES 35 F-R, picotador RS-Serviços, homogeneizador MH 100, sistema de resfriamento, injetora HIMACO modelo LHS-130/400.

A avaliação das propriedades mecânicas foi desenvolvida no Laboratório de Ensaios em Materiais Poliméricos localizado na Central Analítica da UNISC. Para avaliação das propriedades do polipropileno reciclado foram utilizados a Máquina Universal de Ensaios Mecânicos (EMIC DL 10000), Durômetro (Teclock Politest) e o equipamento medidor de Índice de Fluidez *Melt Flow Jr* marca CEAST da Polimate.

## OBTENÇÃO DAS AMOSTRAS

Após retirar o rótulo das bombonas de água mineral (Figura 2) foi efetuada a moagem do material, permitindo a redução de seu volume.



Figura 2 – Bombonas sem rótulo, material limpo em boas condições.

Após a moagem, as bombonas de água mineral deram origem às amostras que foram submetidas aos processos de aglutinação, extrusão, homogeneização e injeção. Na moagem a cominuição das bombonas de água mineral ocorreu em um moinho de facas (Figura 3). Para a realização desta operação foi utilizado 1 kg de material envolvendo o tempo de 3 minutos.



Figura 3 – Moinho de facas utilizado na moagem do material.

A aglutinação (Figura 4) consistiu em uma nova “moagem” do material, permitindo dar a ele uniformidade de tamanho e peso das pequenas partes (*flakes*), facilitando seu processamento. Em alguns casos, como na reciclagem de polímeros de menor densidade o processo de aglutinação é indispensável. Para o polipropileno foi utilizado um tempo de aglutinação de 5 minutos.



**Figura 4** – Aglutinador utilizado no estudo.

A extrusão do PP ocorreu sob as seguintes condições de temperatura: 185°C respectivamente para zona 1, zona 2 e zona 3, e temperatura de aquecimento na matriz igual a 190°C. A velocidade de processamento foi de 60 Hz, logo, o tempo de operação da máquina extrusora para processar a amostra de 1 kg foi de 10 minutos.

Na etapa de homogeneização as amostras foram misturadas em câmara fechada por tempo suficiente para que ocorresse a fusão do material. O tempo de homogeneização totalizou 5 minutos para cada amostra. Na injeção (Figura 5) as temperaturas utilizadas nas zonas de aquecimento foram de 185°C, 185°C e 190°C, respectivamente para as zona 1, 2 e 3. Os tempos de injeção e resfriamento adotados foram, respectivamente, 10 e 15 segundos. Em virtude de ser um processo em ciclo, demorando o equivalente a 25 segundos para injeção de um corpo de prova, o tempo envolvido na injeção das amostras necessárias foi de 10 minutos.



**Figura 5** – Máquina injetora utilizada na confecção dos corpos de prova.

O sistema de resfriamento e o picotador são equipamentos utilizados em paralelo ao processo de extrusão tendo, assim, demandado o mesmo tempo de operação da extrusora, para cada um desses equipamentos (10 minutos).

## LEVANTAMENTO DE DADOS PARA ESTIMATIVA DE CUSTO ENERGÉTICO

Para mensurar o consumo energético foram apuradas informações complementares sobre os equipamentos, tais como a potência desenvolvida pelo motor, potência absorvida da fonte geradora, rendimento do motor elétrico, dentre outras. Essas informações foram obtidas através das placas de identificação presente nos motores elétricos, e também, com consultas aos manuais técnicos de cada equipamento.

No cálculo de gasto energético para as máquinas responsáveis pelo processo de extrusão e injeção, se fez necessário adicionar as potências envolvidas com o aquecimento. Para isso somou-se a potência gasta pelo motor elétrico com a potência necessária para suprir as resistências elétricas de energia. Após organizar esses dados referentes a cada equipamento, aplicamos a Equação 1, onde a energia consumida é dada pela potência absorvida da fonte em função do tempo.



$$E = P.t \text{ (kWh)}$$

Equação (1)

Para os cálculos de consumo de energia foram desconsiderados o rendimento e o fator de potência de motores e resistências elétricas. Também para os cálculos de consumo de energia, os tempos de operação de cada equipamento foram transformados (minutos em horas), visto que o consumo é dado em kWh.

Em virtude da tarifa de energia elétrica oscilar de acordo com a companhia de distribuição, fez-se uso de uma média obtida a partir do preço cobrado pelo kWh obtida de contas de energia elétrica atuais.

## AValiação DAS PROPRIEDADES

Para avaliação das propriedades mecânicas foram injetados corpos de prova para ensaios mecânicos. As amostras de polipropileno obtidas foram avaliadas através de ensaios de tração, flexão, dureza e índice de fluidez. Os ensaios de avaliação de propriedades do material obedeceram as normas:

- Tração: norma ASTM-D638, célula de carga de 500 kgf velocidade do ensaio de 5 mm/min, na Máquina Universal de Ensaios Mecânicos EMIC DL 10000;
- Flexão: norma ASTM-D790, célula de carga de 100 kgf, velocidade do ensaio de 5,3 mm/min, na Máquina Universal de Ensaios Mecânicos EMIC DL 10000;
- Dureza: norma ASTM-D2240, com tempo de 4s no equipamento Durômetro Shore GSD – 702 Teclock Politest, realizado em triplicata para cada amostra;
- Índice de Fluidez: norma ASTM D1238, método L para o polipropileno com temperatura de 230°C, carga no pistão de 2,160 kg e tempo de corte igual a 60 segundos.

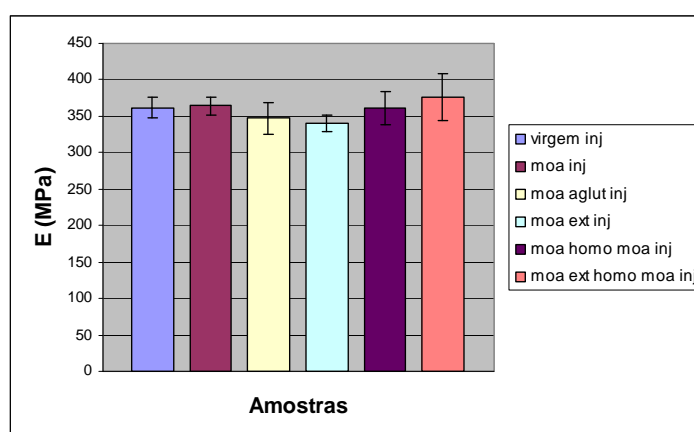
## RESULTADOS

Após submeter às amostras aos processos apresentados na Tabela 2 e realizados os ensaios descritos na metodologia, foram obtidos os gráficos do comportamento das amostras.

A partir desses gráficos foi possível realizar uma discussão sobre quais os processos que mais influenciam nas propriedades do material e também quais desses processos representam maior consumo de energia.

## ENSAIO DE TRAÇÃO

Na Figura 6, observa-se os resultados obtidos após ensaio de tração, para o parâmetro módulo de elasticidade.



**Figura 6** – Resultados do módulo de elasticidade.

O maior valor encontrado para o módulo de elasticidade foi referente à amostra que sofreu a ação de todos os processos envolvidos na reciclagem. Segundo Canevarolo (2002), quando um material é submetido a diferentes processos sua estrutura química pode sofrer alterações. Para Garcia (2000), o aumento no módulo de elasticidade indica maior força de ligamento entre as moléculas e maior grau de cristalinidade.

Na Figura 7 apresentam-se os valores para o parâmetro força máxima do ensaio de tração. Observou-se um decréscimo nessa propriedade com o aumento do número de processos a que foi submetido, e mesmo comparando-se as amostras de PP virgem e de PP pós-consumo.

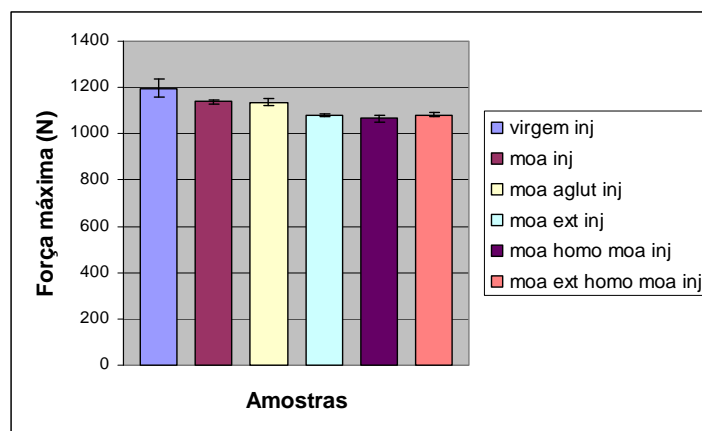


Figura 7 – Força máxima detectada no ensaio de tração.

Portanto, se os valores para força máxima apresentaram redução gradativa, a conclusão é de que a cada etapa do processo contribui para a mudança de propriedade do material. Para a tensão na força máxima foi observado o mesmo comportamento.

## ENSAIO DE FLEXÃO

Para avaliação dos resultados obtidos através dos ensaios de flexão, foram analisados os parâmetros Força Máxima (N), Tensão Máxima (MPa) e Módulo de Elasticidade (MPa). Na Figura 8, são apresentados os valores obtidos para o módulo de elasticidade durante o ensaio de flexão.

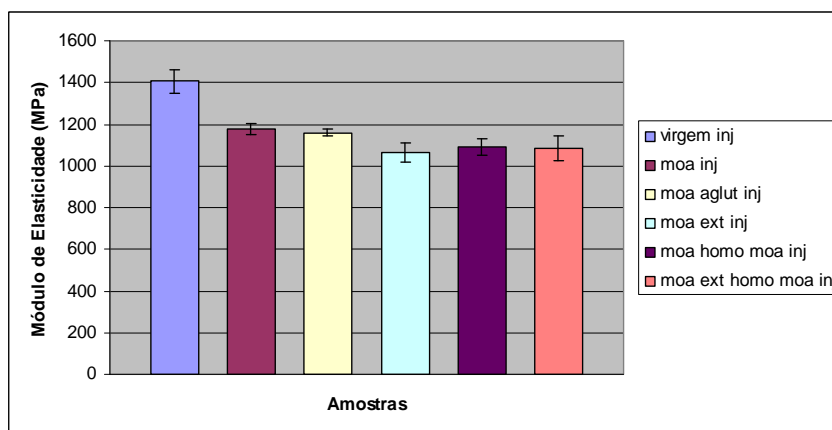


Figura 8 – Valores de módulo de elasticidade no ensaio de flexão.

Observou-se que o menor valor observado do módulo foi para a amostra envolvendo moagem, extrusão e injeção. Todas as amostras de material pós-consumo apresentaram menores valores do que a de PP virgem. Maior foi a degradação percebida, pela flexão das mesmas, nas amostras. Indicando, como nos resultados de tração, que o processo de extrusão é o que mais afeta as propriedades mecânicas do PP.

## ÍNDICE DE FLUIDEZ

Os resultados da determinação do índice de fluidez para as amostras são apresentados no gráfico da Figura 9. Nota-se o aumento da fluidez das amostras conforme o tipo de processos a que foram submetidas. Esse comportamento das amostras (índice de fluidez crescente) caracteriza uma degradação por cisão da cadeia molecular do polímero predominante à degradação por reticulação. A degradação por cisão da cadeia



polimérica faz com que o material escoe mais facilmente, ou seja, torna-o menos viscoso e tem seu peso molecular reduzido.

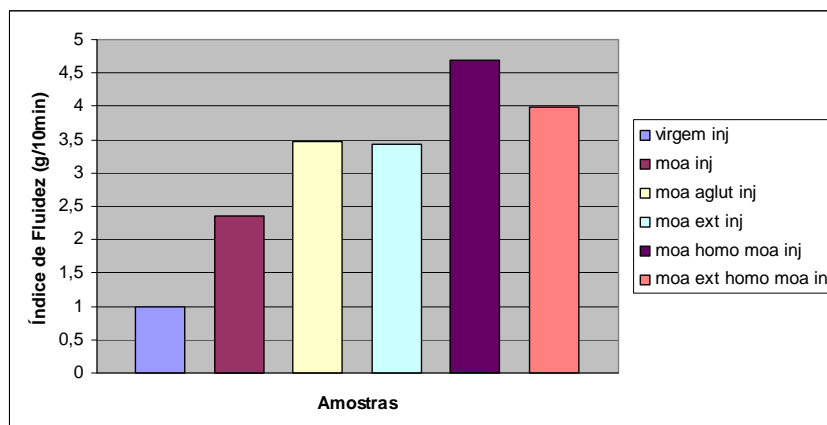


Figura 9 – Resultados da medição do índice de fluidez.

### DUREZA Shore D

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos através do ensaio de dureza *Shore D* onde não foram observadas variações significativas nessa propriedade (superficial). Em virtude disso não pôde-se associar qualquer alteração nos resultados desta propriedade com os tipos de processos utilizados.

Tabela 3 –Dureza *Shore D* das amostras.

AMOSTRA	DUREZA 1	DUREZA 2	DUREZA 3	MÉDIA
virgem inj	64	65	65	64,6
moa inj	65	65	65	65
moa aglut inj	61	62	61	61,3
moa extr inj	63	63	62	62,6
moa homo moa inj	64	63	65	64
moa extr homo moa inj	64	63	64	63,6

### ESTIMATIVA DE CONSUMO ENERGÉTICO

Para o cálculo do valor médio cobrado pelo kWh foram utilizadas 5 contas de luz de 2 diferentes fornecedores, conforme Tabela 4.

Com isso chegou-se o valor médio do preço cobrado pelo kWh, o qual foi utilizado para os cálculos de gasto de energia elétrica.

Tabela 4 – Preço médio do kWh no Estado do Rio Grande do Sul.

ANO	FORNECEDORA	VALOR DO kWh (R\$)
2007	C.E.E.E - litoral	0,3994
2007	AES Sul – mês 1	0,33
2007	AES Sul – mês 2	0,32
2007	AES Sul – mês 3	0,29
2007	AES Sul – mês 4	0,32
Média		0,33

Levando em consideração as informações disponíveis sobre cada equipamento, foi dada origem à Tabela 5, onde são apresentados os valores de potência dos equipamentos, bem como o tempo envolvido em cada operação para o processamento de 1 kg de polipropileno pós-consumo. Com base nesses dados foi efetuado o cálculo do gasto energético durante os processos utilizados.





Tabela 5 – Estimativa do custo energético envolvido em cada processo.

PROCESSO	TEMPO (min)	P DESENVOLVIDA (cv)	P ABSORVIDA (kW)	P AQUECIMENTO (kW)	CONSUMO (R\$)
Moagem	3	10	7,5	Não há.	0,12375
Aglutinação	5	5	3,7	Não há.	0,10175
Extrusão	10	4	3	3,5	0,4125
Picotamento	10	1	0,75	Não há.	0,04125
Resfriamento	10	Não consta	0,7	Não há.	0,0385
Homogeneização	5	Não consta	9,5	Não há.	0,26125
Injeção	10	20	15	10,6	1,41

Os processos que apresentaram maiores custos foram, em ordem crescente, os de homogeneização, extrusão e injeção. Além disso, com os resultados obtidos, pôde-se perceber que o custo envolvido para reciclar 1 kg de PP é pequeno se comparando aos custos envolvendo a obtenção de materiais virgens.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pelos resultados alcançados os processos que mais influenciaram a degradação do PP foram a extrusão e a homogeneização. Em ambos o cisalhamento acompanhado do aquecimento do material causou essa degradação. Para o caso da extrusão, pode-se inferir que o tempo de residência do material sob aquecimento, causa a perda de propriedades deste material. Já para a homogeneização a velocidade de cisalhamento é a que pode estar mais vinculada à degradação, uma vez que o tempo de processamento é pequeno e a temperatura alcançada é aquela necessária para promover a fusão do material.

Além disso, utilizando-se apenas os processos de moagem e injeção para o material pós-consumo observou-se que as propriedades foram menos afetadas quando comparadas com as do PP virgem injetado. E neste caso o consumo de energia elétrica é bem menor que para os outros casos.

Em relação a estimativa de custo energético, fica claro que a energia empregada para efetuar a reciclagem do material é relativamente baixa quando comparada ao gasto de energia envolvidos para obtenção das resinas termoplásticas virgens. Somado a isso, o imenso fator ambiental agregado possibilita afirmar que a reciclagem contribui para o desenvolvimento sustentável, uma vez que pode ser economicamente viável, gerar emprego e renda, entre outros.

### AGRADECIMENTOS

Ao Pólo de Modernização Tecnológica - Vale do Rio Pardo, ao CNPq e à FAPERGS.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CANEVAROLO Jr, S. V., *Ciência dos polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros*. São Paulo: Artliber Editora, 2002.
2. CANTO, Eduardo do., *Plástico: bem supérfluo ou mal necessário?* São Paulo: Moderna, 1995. 88p.
3. CEMPRE. Desenvolvido pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem apresenta informações sobre consumo e geração de materiais plásticos no Brasil. Disponível em: <http://www.cempre.org.br>.
4. GARCIA, A., SPIM, J. A., SANTOS C. A., *Ensaio dos Materiais*. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2000.